

# 秸秆还田稻田土壤生物有效性磷及水稻磷吸收

蒋炳伸<sup>1,3,4</sup>, 沈健林<sup>1,2</sup>, 王娟<sup>1,2</sup>, 李勇<sup>1,2</sup>, 吴金水<sup>1,2,3</sup>

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所,亚热带农业生态过程重点实验室,

长沙 410125;2.中国科学院长沙农业环境观测研究站,长沙 410125;

3.中国科学院大学,北京 100049;4.黄淮学院生物与食品工程学院,河南 驻马店 463000)

**摘要:** 基于生物有效性的土壤磷(biologically-based P, BBP)分级方法从植物根际介导的磷吸收机制的4个方面,即根截获、有机酸螯合、酶水解和质子分泌产生的酸化来对土壤磷进行分级,能够更便捷地评价土壤磷的有效性状况。以我国亚热带典型双季稻田为研究对象,田间试验设置秸秆未还田且间歇淹水(S0W1)、秸秆还田且间歇淹水(S1W1)、秸秆未还田且长期淹水(S0W2)和秸秆还田且长期淹水(S1W2)4个处理,采用BBP法测定4种生物有效性磷,即氯化钙溶液浸提的磷( $\text{CaCl}_2\text{-P}$ )、酶溶液浸提的磷(Enzyme-P)、柠檬酸溶液浸提的磷(Citrate-P)和盐酸溶液浸提的磷( $\text{HCl-P}$ ),测定了水稻磷含量并计算磷吸收量,旨在探讨秸秆还田和水分管理对稻田土壤生物有效性磷组分和水稻磷吸收的影响。结果表明:早稻季,秸秆还田处理较相应秸秆未还田处理显著增加土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Enzyme-P和Citrate-P,长期淹水较间歇灌溉增加 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和Citrate-P;晚稻季,秸秆还田处理较相应秸秆未还田处理显著增加Enzyme-P和Citrate-P,长期淹水较间歇灌溉增加 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 。秸秆还田配合间歇灌溉及秸秆未还田配合长期淹水在早晚稻季均较对应处理(S0W1)降低 $\text{HCl-P}$ 。土壤有效磷与Enzyme-P和Citrate-P呈显著正相关,表明稻田有效磷主要来源于Enzyme-P和Citrate-P。秸秆还田处理较相应的秸秆未还田处理相比较显著降低早稻籽粒磷总吸收量,尤其长期淹水条件下,早稻磷总吸收量最低;而晚稻季秸秆还田处理水稻籽粒和秸秆磷吸收量高于秸秆未还田处理,且水分管理影响不显著。生物有效性磷含量(除 $\text{HCl-P}$ 外)与水稻磷含量呈显著正相关,与早稻磷总吸收量呈负相关,而与晚稻磷总吸收量呈正相关。稻田土壤Citrate-P含量仅次于 $\text{HCl-P}$ ,表明土壤Citrate-P对水稻磷吸收起主要贡献。综合来看,双季稻田秸秆还田有利于提高土壤磷素有效性和水稻磷素利用率。

**关键词:** 秸秆还田;水分管理;土壤生物有效性磷;水稻总磷吸收;水稻磷含量

**中图分类号:** S141.4;S154.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2020)06-0309-09

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.043

## Effect of Straw Incorporation on Biologically-Based Phosphorus Fractions and Phosphorus Uptake by Rice in Paddy Field

JIANG Bingshen<sup>1,3,4</sup>, SHEN Jianlin<sup>1,2</sup>, WANG Juan<sup>1,2</sup>, LI Yong<sup>1,2</sup>, WU Jinshui<sup>1,2,3</sup>

(1.Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of

Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125; 2.Changsha Research

Station for Agricultural & Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese

Academy of Sciences, Changsha 410125; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

4.College of Biological and Food Engineering, Huanghuai University, Zhumadian, Henan 463000)

**Abstract:** The biologically-based soil phosphorus (BBP) fractionation method assesses soil P availability by considering plant rhizosphere mediated P acquisition mechanisms: root interception, organic acid complexation, enzyme hydrolysis and acidification caused by proton excretion, and is a convenient method to reflect soil P status. This study examined the effects of straw incorporation and water management on biologically-based soil P fractions and rice P uptake in a double rice cropping system in subtropical China. Four treatments were set up, that was (i) no straw incorporation with intermittent irrigation (S0W1), (ii) rice straw incorporation with intermittent irrigation (S1W1), (iii) no straw incorporation with continuous flooding (S0W2), and (iv) straw incorporation with continuous flooding (S1W2). Four kinds of biologically-based soil P fractions were

收稿日期:2020-04-12

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200307,2018YFC0213302)

第一作者:蒋炳伸(1975—),女,博士研究生,主要从事土壤磷素循环研究。E-mail:jiang20020410@163.com

通信作者:沈健林(1982—),男,副研究员,主要从事土壤养分循环与环境效应研究。E-mail:jlshen@isa.ac.cn

measured using the BBP fractionation method, which are the P fractions extracted by  $\text{CaCl}_2$  solution ( $\text{CaCl}_2\text{—P}$ ), citric acid solution (Citrate—P), phytase and phosphatase solution (Enzyme—P), and HCl solution (HCl—P). The results showed that straw incorporation treatments significantly increased the contents of soil  $\text{CaCl}_2\text{—P}$ , Enzyme—P, and Citrate—P, compared with the corresponding no straw incorporation treatments, while continuous flooding increased  $\text{CaCl}_2\text{—P}$  and Citrate—P, compared with intermittent irrigation in the early rice season. Straw incorporation treatments significantly increased the contents of Enzyme—P and Citrate—P, compared with the corresponding no straw incorporation treatments, and continuous flooding increased  $\text{CaCl}_2\text{—P}$ , compared with intermittent irrigation in the late rice. HCl—P was reduced in rice straw incorporation with intermittent irrigation and no straw incorporation with continuous flooding, compared with the corresponding rice straw incorporation with continuous flooding and no straw incorporation with intermittent irrigation, irrespective of the early and late rice season. The main sources of available P in paddy soil were Enzyme—P and Citrate—P because of soil available P being positive correlation with Enzyme—P and Citrate—P. Straw incorporation treatments significantly reduced rice grain P uptake, compared with the corresponding no straw incorporation treatments in the early rice season, and the rice P uptake was the lowest in straw incorporation with continuous flooding. In the late rice season, straw incorporation significantly increased both grain and straw P uptake of rice, compared with the corresponding no straw incorporation treatments, and water managements had no significantly difference in P uptake of rice. Except for HCl—P, soil biologically-based phosphorus was positively correlated with total P uptake, and was negative correlation with total P uptake in the early rice season, while was positively correlated with rice P content in the late rice season. Soil Citrate—P content was the second among the four kinds of BBP fractions (only lower than HCl—P), so Citrate—P played a major role in rice P uptake. Straw incorporation is beneficial to improve soil P availability and rice P utilization in the double rice cropping system.

**Keywords:** straw incorporation; water management; biologically-based phosphorus; rice total phosphorus uptake; rice phosphorus content

磷(P)是植物生长发育所必需的大量营养元素之一,参与生物体的各种代谢过程,土壤磷素含量及形态显著影响水稻的生长发育、抗逆性及产量<sup>[1]</sup>。植物生长所需的磷素主要来自可溶性磷、吸附态磷和矿化的有机磷<sup>[2]</sup>。土壤磷的生物有效性是指土壤向植物根系供应磷的过程,它受土壤 pH、氧化还原电位、水分、温度、微生物和植物根系分泌的有机酸、磷酸酶和质子等因素综合作用的影响<sup>[3-4]</sup>。

基于生物有效性磷素分级方法(biologically based P, BBP 法)是由 Deluca 等<sup>[5]</sup>对众多磷分级方法进行优化整合而创建的,该方法选择氯化钙溶液、柠檬酸盐溶液、酶(磷酸酶和植酸酶)溶液以及盐酸溶液浸提土壤磷素来模拟植物根际或微生物介导的 4 种最常见且重要的磷素捕获机制,即根截获、有机酸螯合、酶水解和质子分泌产生的酸化,能够恰当评价土壤各种磷形态的生物有效性。蔡观等<sup>[6]</sup>应用此法分析了旱地与稻田中生物有效性磷组分特征发现,旱地有效磷主要来源于  $\text{CaCl}_2\text{—P}$  和 Enzyme—P,而水稻土有效磷主要来源于 Citrate—P;刘玉槐等<sup>[7]</sup>研究发现, $\text{CaCl}_2\text{—P}$  和 Citrate—P 影响非根际土壤中的磷酸酶活性,而 HCl—P 和 Enzyme—P 则影响水稻

根际土壤磷酸酶活性;袁佳慧等<sup>[8]</sup>应用此方法研究发现,太湖稻麦轮作区磷肥减施下稻田土壤生物有效性磷主要受土壤 pH、碱性磷酸酶活性的影响;黄翊兰等<sup>[9]</sup>应用此方法研究发现,滨海滩涂湿地不同植被土壤有效磷主要来自于有机酸活化的无机磷(Citrate—P),生物有效性磷组分受土壤水分和有机质等因素影响。BBP 法已经广泛应用于评价不同生态系统土壤生物有效性磷组分特征,但较少应用此法研究双季稻田土壤生物有效性磷素组分特征及其与水稻磷吸收的关系。

秸秆还田和水管理是水稻生产中重要的农田管理措施。水稻秸秆含有丰富的碳、氮、磷等多种营养物质,施入土壤能为微生物提供大量的外源碳和养分,降低了土壤微生物对根系分泌物(胞外酶及有机酸等)的同化作用<sup>[10]</sup>,提高土壤磷酸盐矿化率<sup>[11]</sup>,磷酸酶活性也显著增加,增加有机磷矿化率,土壤有效磷含量增加<sup>[12]</sup>。稻田水分管理影响土壤氧化还原电位,从而对养分的吸附固持、微生物分解、养分运移等一系列过程产生影响。长期淹水的酸性土壤氧化还原电位(Eh)降低,促使沉淀铁( $\text{Fe}^{3+}$ )磷酸盐向可溶性铁( $\text{Fe}^{2+}$ )磷酸盐转化,释放出可溶性磷素<sup>[13-14]</sup>,土

壤有效性磷素含量增加。双季稻体系早稻季和晚稻季的温度差异显著,影响稻草降解速度和养分释放<sup>[14]</sup>,也影响土壤有效磷。然而,双季稻体系秸秆还田和水分管理配合下如何影响土壤生物有效性磷及水稻磷吸收还不尚清楚。本研究依托田间定位试验,通过设置仅施化肥、秸秆还田并配合间歇灌溉、长期淹水 2 种水分管理下的 4 个处理,旨在明确秸秆还田和水分管理影响下双季稻田土壤生物有效磷素特征及其与水稻磷吸收的关系,以期为稻田磷素高效利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验点位于湖南省长沙县金井镇 1 个典型双季稻田(28°33′04″N,113°19′52″E),海拔 80 m,该区多年平均气温 17.5 ℃,年均日照时间 1 663 h,年均降水量 1 330 mm,年均无霜期 274 d。试验稻田土壤母质为花岗岩红壤<sup>[15]</sup>,试验前 0—20 cm 耕层土壤基本化学性质为:有机碳含量 18.9 g/kg,土壤全氮含量 1.78 g/kg,土壤全磷含量 0.57 g/kg,土壤全钾含量 31.7 g/kg,土壤速效磷含量 11.1 mg/kg,pH(H<sub>2</sub>O)为 5.1。

### 1.2 试验设计与方法

田间试验开始于 2012 年早稻季,共设置 4 个处理:(1)秸秆不还田(S0W1),仅施化肥,间歇灌溉;(2)秸秆还田(S1W1),施用秸秆量为 6 t/hm<sup>2</sup>,间歇灌溉;(3)秸秆不还田(S0W2),仅施化肥,长期淹水;(4)秸秆还田(S1W2),施用秸秆量为 6 t/hm<sup>2</sup>,长期淹水。秸秆还田处理 N、P 和 K 总养分投入量与秸秆未还田处理一致,其化肥投入量为总养分投入量减去秸秆还田带入的养分量,早晚稻季还田的秸秆平均养分含量为:有机碳含量 395.2 g/kg,全氮含量 6.5 g/kg,全磷含量 1.8 g/kg,全钾含量 23.4 g/kg。各处理在早稻季和晚稻季所需总氮(N)和总磷(P)分别为:120,150 kg/hm<sup>2</sup> 和 17.5,25.1 kg/hm<sup>2</sup>,所需总钾(K<sub>2</sub>O)在早稻季和晚稻季均为 100 kg/hm<sup>2</sup>。还田秸秆均来自试验小区上一季收获的稻草,其还田量均按烘干重来计算,稻草还田前均切成 5~7 cm 长,然后在水稻移栽之前按上述还田量全部一次翻埋于土壤耕层<sup>[16]</sup>。所施用化肥为尿素(以 N 计)、过磷酸钙(以 P 计)和氯化钾(以 K<sub>2</sub>O 计),在早稻季和晚稻季,氮肥按 5:5 比例作为基肥和追肥施用,追肥在水稻生长的分蘖期、抽穗期按 3:2 的比例追施,而磷和钾肥作为基肥一次性施入。

试验小区设置 2 种水分管理方式:长期淹水,插秧后稻田保持淹水状态直到收割前 1 周排干水;间歇灌溉,依据传统稻田水分管理模式,插秧后田间淹水 30 天,然后排干水,晒田 10~15 天,再灌溉直到收割

前 1 周排干水。每个试验小区面积为 35 m<sup>2</sup>(5 m×7 m),每个处理重复 3 次,试验小区之间用水泥埂隔开,试验田周围留有保护行。

考虑到秸秆还田对土壤性质的影响需要一定的年限,本研究在田间定位试验进行的第 5 年(2016 年)和第 6 年(2017 年)开展秸秆还田对土壤生物有效磷及水稻磷素吸收研究。田间试验的 4 个处理(S0W1、S1W1、S0W2 和 S1W2)土壤全磷含量在 2012—2015 年变化范围分别为 0.55~0.57,0.52~0.54,0.52~0.54,0.53~0.54 g/kg,且处理之间土壤全磷含量无显著差异,2012 年各处理与试验前的基础土壤全磷含量接近,从 2013 年开始土壤全磷含量降低,但 2013—2015 年各处理土壤全磷含量较稳定(表 1)。

表 1 2012—2015 年土壤全磷含量的年动态变化

| 单位:g/kg |            |            |            |            |
|---------|------------|------------|------------|------------|
| 处理      | 2012 年     | 2013 年     | 2014 年     | 2015 年     |
| S0W1    | 0.57±0.01a | 0.54±0.01a | 0.53±0.02a | 0.54±0.03a |
| S0W2    | 0.56±0.01a | 0.52±0.02a | 0.54±0.01a | 0.54±0.01a |
| S1W1    | 0.55±0.02a | 0.52±0.01a | 0.52±0.01a | 0.54±0.01a |
| S1W2    | 0.56±0.01a | 0.53±0a    | 0.52±0.01a | 0.53±0.01a |

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

### 1.3 样品采集与处理

本研究样品采集于田间定位试验开展的第 5 年(2016 年)和第 6 年(2017 年)。早晚季稻田土样分别在水稻成熟期进行采集,每个试验小区随机选取 5 个采样点,采集表层土壤(0—20 cm),除去杂质,混合均匀,带回实验室,土样分成 2 部分:一部分贮藏在 4 ℃冰箱,以备生物有效性磷组分及微生物生物量碳、氮及磷等的测定;另一部分自然风干,磨细,过筛,室温保存,以备有机碳、全磷、全氮及速效磷及 pH 等的测定。植物样品与土壤样品同时采集,新鲜的水稻样冲洗干净后放入烘箱 70 ℃烘干至恒重,磨碎,室温保存<sup>[17]</sup>。本研究的分析数据为 2 年试验数据的平均值。

### 1.4 样品测定

1.4.1 BBP 法测定土壤生物有效磷 采用 BBP 法<sup>[5-6]</sup>对生物有效性磷进行分级,即 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub>、0.02 EU(酶单位)/mL 酶溶液、0.01 mol/L Citrate(柠檬酸)溶液及 1 mol/L HCl 各 10 mL 分别加入到装有 0.5 g 鲜土的离心管中进行平行浸提,180 r/min (25 ℃) 振荡 3 h,然后吸取 1 mL 于 1.5 mL 的离心管,25 ℃ 100 000 r/min 离心 1 min,随后吸取上清液于酶标板中,Citrate—P 和 HCl—P 含量高做适当稀释,采用孔雀石绿比色法,多功能酶标仪(Infinite M20,PRO,瑞士)在波长 630 nm 处,测定 CaCl<sub>2</sub>—P、Enzyme—P、Citrate—P 和 HCl—P 含量。0.02 EU/mL 酶溶液是由酸性磷酸酶(Sigma P3627; Enzyme Commission Number 232—630—9)和植酸酶

(Sigma P1259; Enzyme Commission Number 3.1.3.26)的混合溶液,使酶活化的有机磷组分更加全面和有代表性,且采用纯水代替醋酸钠缓冲溶液,避免有机磷组分受无机磷影响,同时利用差减法扣除纯水提取的无机磷。由于植酸酶本身含有磷酸,植酸酶必须用透析袋透析 5 天(4 ℃)除去磷,孔雀石绿比色法测定,由于孔雀石绿不易受有机酸干扰<sup>[5-6]</sup>。

1.4.2 土壤和植物基本指标测定 土壤基础化学指标分析参考《土壤农化分析》<sup>[17]</sup>,土壤 pH 采用 pH 计( PHS—3C,上海利达仪器厂,中国)测定(土水比为 1∶2.5);土壤全磷(STP)采用氢氧化钠熔融,土壤速效磷(SAP)采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> (pH=8.5)进行浸提,STP 和 SAP 均采用钼锑抗比色法,紫外可见分光光度计在 882 nm 处测定(UV2600 型,日本岛津公司有限公司,香港)。土壤全氮(STN)测定以 1∶10 硫酸铜和硫酸钾为催化剂,用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消化法得到消解液,再用连续流动分析仪测定(FIAstar 5000 型,福斯特卡托公司,瑞典)。

土壤微生物生物量磷(SMBP)采用“氯仿熏蒸—0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> (pH=8.5)浸提法”<sup>[18]</sup>,采用钼锑抗比色法,紫外可见分光光度计测定。同时用外加 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 的方法测定磷的回收率,以熏蒸与不熏蒸土样磷的差值并校正提取回收率后除以转换系数(0.45)来计算 MBP。土壤微生物生物量碳和氮(SMBC 和 SMBN)采用“氯仿熏蒸—0.5 mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法”<sup>[18]</sup>, SMBC 采用 TOC 自动分析仪(Phoenix—8000,日本岛津公司有限公司,香港)测定。SMBN 用连续流动

分析仪测定。以熏蒸与不熏蒸土样的有机碳和氮的差值分别除以转换系数(0.45)来计算 MBC 和 MBN。

植物根、留茬、秸秆及籽粒磷含量参考《土壤农化分析》<sup>[17]</sup>采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮、钼锑抗比色法,紫外分光光度计测定。

1.5 数据统计分析

试验数据统计采用 Excel 2010 软件以及 Sigma—plot 12.5 软件(Sigmaplot 12.5,California, USA)作图,利用 SPSS 19.0 软件(SPSS 19.0, Chicago, USA)的单因素 ANOVA 中的 Duncan 法( $P<0.05$ )对生物有效性磷进行显著性差异分析,生物有效性磷与水稻磷含量和水稻磷吸收量进行 Pearson 相关分析,以及双因素方差分析秸秆还田、水分管理及两者之间交互作用对生物有效性磷的影响。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田和水分管理对稻田土壤性质的影响

各处理稻田土壤年均 SOC、TN、TP、MBC、MBN、MBP 和 SAP 及 pH 的差异显著性分析见表 2。秸秆还田处理(S1W1、S1W2)较相应的秸秆未还田处理(S0W1、S0W2)显著增加 SOC、TN、MBC、MBP 和 SAP,增幅分别达 10.2%~19.2%,8.7%~16.4%,10.5%~22.9%,7.4%~18.3%和 8.5%~15.3%;秸秆还田在间歇灌溉条件下增加 pH,长期淹水条件增加了 MBN,秸秆还田未增加 STP。在水分管理方面,无秸秆还田条件下间歇灌溉增加 SOC、TN、MBC、MBP,长期淹水仅在秸秆条件下较间歇灌溉增加 TN 和 MBN。

表 2 秸秆还田和水分管理对水稻土壤基本性质的影响

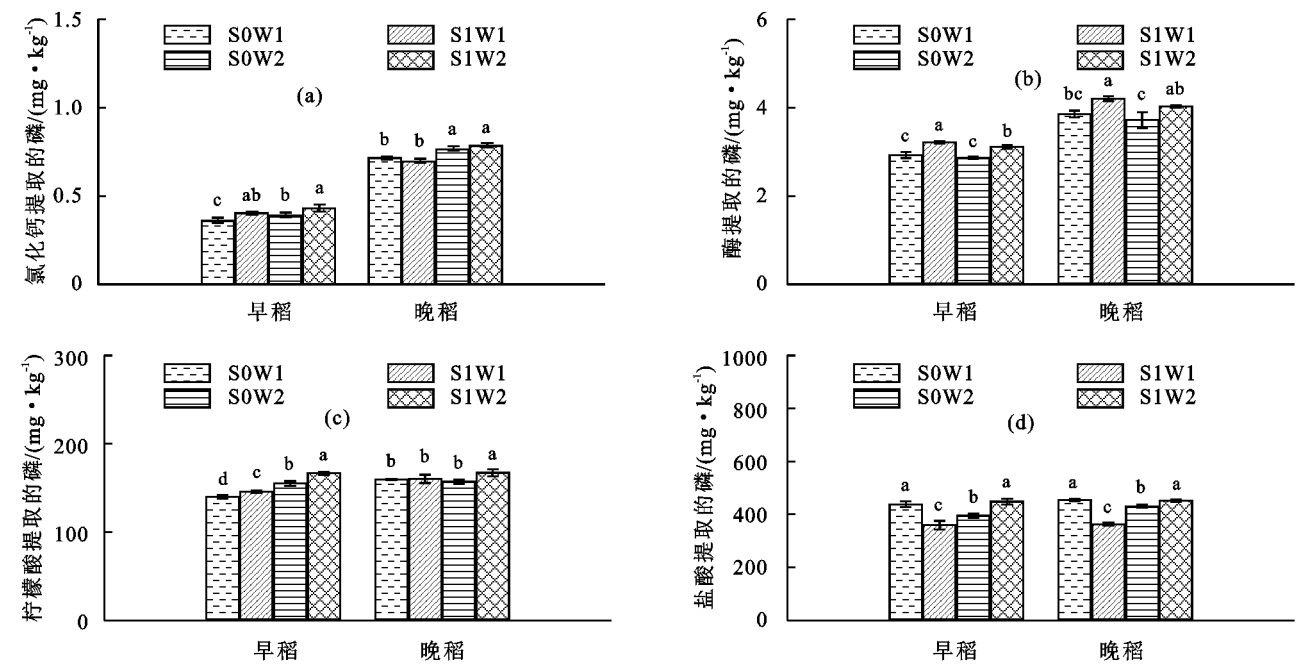
| 处理   | 有机碳 SOC/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮 TN/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全磷 TP/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 微生物量碳 MBC/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 微生物量氮 MBN/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 微生物量磷 MBP/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效磷 SAP/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | pH         |
|------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------|
| S0W1 | 19.0±0.5b                         | 1.9±0c                          | 0.56±0a                         | 658.2±17.4b                          | 33.9±1.9b                            | 23.0±1.6b                            | 8.9±0.4b                           | 5.2±0.02b  |
| S1W1 | 21.0±1.8a                         | 2.0±0b                          | 0.56±0a                         | 727.4±26.0a                          | 35.1±1.9b                            | 24.7±0.9a                            | 9.6±0.4a                           | 5.4±0.13a  |
| S0W2 | 17.0±0.5c                         | 1.8±0d                          | 0.55±0a                         | 587.8±35.5c                          | 33.6±1.8b                            | 21.5±2.0c                            | 8.5±0.5b                           | 5.3±0.08ab |
| S1W2 | 21.4±0.7a                         | 2.2±0a                          | 0.56±0a                         | 722.5±35.3a                          | 38.2±1.7a                            | 25.4±2.0a                            | 9.8±0.8a                           | 5.3±0.03ab |

注:表中各养分含量为早、晚稻季养分的平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

2.2 秸秆还田和水分管理对生物有效性磷组分的影响

2.2.1 生物有效性磷组分 早稻季,CaCl<sub>2</sub>—P、Enzyme—P、Citrate—P 和 HCl—P 含量变化范围分别为 0.5~0.6,2.9~3.2,139.7~166.6,359.1~448.2 mg/kg(图 1)。秸秆还田处理(S1W1、S1W2)较相应的秸秆未还田处理(S0W1、S0W2)显著增加 CaCl<sub>2</sub>—P、Enzyme—P、Citrate—P,增幅分别达 9.6%~11.6%,8.3%~9.8%,4.3%~7.4%;双因素方差分析表明,秸秆还田(S)对 CaCl<sub>2</sub>—P、Enzyme—P 和 Citrate—P 具有显著影响( $P<0.01$ )(表 3)。秸秆还田仅在长期淹水条件下增加 HCl—

P,间歇灌溉条件下秸秆还田降低 HCl—P。在水分管理方面,长期淹水较间歇灌溉主要增加 CaCl<sub>2</sub>—P 和 Citrate—P,增幅分别可达 6.7%~8.6%和 4.3%~7.4%;间歇灌溉较长期淹水增加 Enzyme—P,增幅为 9.6%~11.6%;秸秆还田条件下长期淹水较间歇灌溉增加 HCl—P,无秸秆还田条件下间歇灌溉增加 HCl—P。双因素方差分析表明,水分管理(W)对 CaCl<sub>2</sub>—P、Citrate—P 和 HCl—P 具有显著影响( $P<0.01$ );两者(S×W)交互作用对 Citrate—P 和 HCl—P 具有极显著影响( $P<0.01$  或  $P<0.001$ )(表 3)。



注:图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

图 1 秸秆还田和水分管理对生物有效性磷素组分的影响

晚稻季,  $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 、Enzyme—P、Citrate—P 和  $\text{HCl—P}$  含量变化范围分别为 0.9~1.1, 3.7~4.2, 157.1~167.1 和 362.8~452.1 mg/kg(图 1)。秸秆还田处理(S1W1、S1W2)较相应的秸秆未还田处理(S0W1、S0W2)显著增加 Enzyme—P, 增幅达 8.3%~9.1%; 秸秆还田仅在长期淹水条件下增加 Citrate—P 和  $\text{HCl—P}$ , 间歇灌溉条件下秸秆还田降低  $\text{HCl—P}$ 。双因素方差分析表明, 秸秆还田(S)对 Enzyme—P、Citrate—P 和  $\text{HCl—P}$  具有显著影响( $P<0.01$ ) (表 3)。在水分管理方式方面, 长期淹水较间歇灌溉

主要增加  $\text{CaCl}_2\text{—P}$ , 增幅分别可达 7.9%~13.0%; 长期淹水仅在秸秆条件下较间歇灌溉增加 Citrate—P 和  $\text{HCl—P}$ ; 无秸秆还田条件下间歇灌溉增加  $\text{HCl—P}$ ; 间歇灌溉仅在秸秆条件下较长期淹水增加 Enzyme—P。双因素方差分析, 水分管理(W)对  $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 、Enzyme—P 和  $\text{HCl—P}$  具有极显著影响( $P<0.01$ ); 秸秆还田和水分管理( $\text{S}\times\text{W}$ )交互作用对  $\text{CaCl}_2\text{—P}$  和 Citrate—P 具有显著影响( $P<0.05$ ), 而对 Enzyme—P 和  $\text{HCl—P}$  具有极显著影响( $P<0.01$  或  $P<0.001$ ) (表 3)。

表 3 生物有效性磷素组分对秸秆还田(S)和水分管理(W)响应的双因素方差分析( $F$  值)

| 因子                                         | 早稻                       |          |           |                | 晚稻                       |          |           |                |
|--------------------------------------------|--------------------------|----------|-----------|----------------|--------------------------|----------|-----------|----------------|
|                                            | $\text{CaCl}_2\text{—P}$ | Enzyme—P | Citrate—P | $\text{HCl—P}$ | $\text{CaCl}_2\text{—P}$ | Enzyme—P | Citrate—P | $\text{HCl—P}$ |
| 秸秆(S)                                      | 27.9**                   | 19.1**   | 37.1**    | 3.1            | 3.7                      | 41.0**   | 25.2**    | 27.5**         |
| 水分(W)                                      | 12.7**                   | 2.9      | 235.1***  | 12.5**         | 92.6***                  | 17.3**   | 1.3       | 38.3**         |
| 秸秆 $\times$ 水分( $\text{S}\times\text{W}$ ) | 0.024                    | 0.18     | 5.4*      | 108.5***       | 6.0*                     | 12.5**   | 6.3*      | 102.4***       |

注: \* 表示  $P<0.05$ ; \*\* 表示  $P<0.01$ ; \*\*\* 表示  $P<0.001$ 。

2.2.2 生物有效性磷与土壤性质的关系 年均生物有效性磷( $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 、Enzyme—P、Citrate—P 和  $\text{HCl—P}$ ) 与土壤化学性质的 Pearson 相关分析见表 4。 $\text{CaCl}_2\text{—P}$  与 MBN 显著正相关, 其余相关性不显著。Enzyme—P 与 MBC、MBP 和 TN 极著正相关, 其余相

关性不显著。Citrate—P 与 MBN 和 pH 呈显著正相关, 其余相关性不显著。 $\text{HCl—P}$  与 TP 显著负相关, 其余相关性不显著。SAP 与 Enzyme—P 及 Citrate—P 呈显著正相关, 表明稻田土壤有效磷主要来自于生物有效性磷组分中的 Enzyme—P 和 Citrate—P。

表 4 年均生物有效性磷组分与土壤化学性质之间的 Pearson 相关分析

| 有效磷组分                    | MBC     | MBN     | MBP     | SOC     | TN      | TP      | SAP     | pH     |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| $\text{CaCl}_2\text{—P}$ | 0.096   | 0.606*  | 0.290   | 0.191   | 0.268   | -0.553  | 0.281   | 0.401  |
| Enzyme—P                 | 0.890** | 0.541   | 0.759** | 0.835** | 0.847** | 0.371   | 0.761** | 0.294  |
| Citrate—P                | 0.271   | 0.726** | 0.460   | 0.376   | 0.437   | -0.403  | 0.579*  | 0.593* |
| $\text{HCl—P}$           | -0.180  | 0.275   | -0.006  | -0.096  | -0.075  | -0.661* | -0.083  | 0.240  |

注: \* 表示  $P<0.05$ ; \*\* 表示  $P<0.01$ 。

2.3 秸秆还田和水分管理对水稻磷吸收的影响

2.3.1 水稻磷含量 早稻季,根、留茬、秸秆和籽粒磷含量变化范围分别为 1.1~1.4,1.6~1.9,2.0~2.3,3.1~3.3 g/kg(图 2a)。秸秆还田处理(S1W1、S1W2)较相应的秸秆未还田处理(S0W1、S0W2)显著增加了根、留茬、秸秆和籽粒磷含量,增幅分别达 16.9%~35.0%,9.2%~10.4%,8.6%~13.6%和 4.5%~6.8%。在水分管理方面,长期淹水仅在无秸秆还田条件下较间歇灌溉降低了根和留茬磷含量,秸秆条件下较间歇灌溉降低了留茬磷含量;而水分管理在秸秆条件下对根、秸秆和籽粒磷含量无显著影响

响;水分管理在无秸秆条件下对秸秆和籽粒磷含量无显著影响。

晚稻季,根、留茬、秸秆和籽粒含量变化范围分别为 1.6~2.0,1.7~2.5,1.8~2.4,2.7~2.8 g/kg(图 2b)。秸秆还田处理(S1W1、S1W2)较相应的秸秆未还田处理(S0W1、S0W2)显著增加了根、秸秆和籽粒磷含量,增幅分别达 29.6%~38.0%,10.2%~30.1%和 0.5%~3.6%;秸秆还田仅在长期淹水条件下增加根、留茬和秸秆磷含量,间歇灌溉条件下秸秆还田降低留茬磷含量。在水分管理方式方面,长期淹水仅在秸秆条件下较间歇灌溉增加根、留茬和秸秆磷含量。

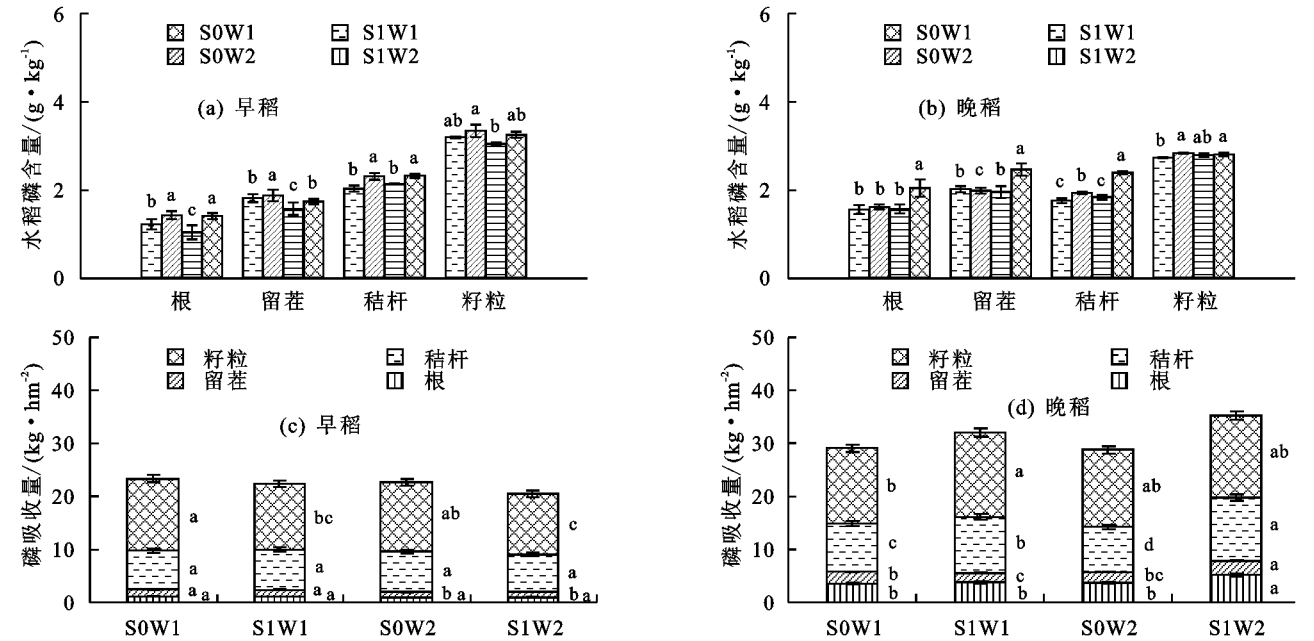


图 2 秸秆还田和水分管理处理的水稻磷含量及水稻磷吸收量

2.3.2 水稻磷吸收 早稻季,S0W1、S1W1、S0W2 和 S1W2 处理的水稻磷总吸收量分别为 23.4,22.3,22.7,20.5 kg/hm<sup>2</sup>(图 2c)。秸秆还田处理(S1W1、S1W2)较相应的秸秆未还田处理(S0W1、S0W2)显著降低了水稻磷总吸收量和籽粒磷吸收量,减幅分别达 4.5%~9.6%和 9.9%~12.5%。在水分管理方面,长期淹水较间歇灌溉主要降低了水稻磷总吸收量和籽粒磷吸收量,降低幅度分别为 2.9%~8.8%和 4.2%~8.8%,尤其是秸秆还田在长期淹水条件下较间歇灌溉显著降低了水稻磷吸收量和籽粒磷吸收量。

影响不同,对早稻磷吸收为负调控,而对晚稻磷吸收呈正调控。

2.4 秸秆还田和水分管理条件下对生物有效性磷组分与水稻磷吸收的关系

早稻季,CaCl<sub>2</sub>-P 和 Citrate-P 与水稻磷素总吸收量呈显著负相关,并与水稻秸秆磷含量显著正相关,Enzyme-P 与水稻磷素总吸收量无显著相关,但与水稻根、秸秆和籽粒磷含量呈显著正相关,HCl-P 与水稻磷素总吸收量以及水稻磷含量无显著相关(表 5)。

晚稻季,S0W1、S1W1、S0W2 和 S1W2 处理水稻磷总吸收量分别为 29.1,32.1,28.8,35.3 kg/hm<sup>2</sup>(图 2d)。秸秆还田处理(S1W1、S1W2)较相应的秸秆未还田处理(S0W1、S0W2)显著增加了水稻磷总吸收量和籽粒磷吸收量,增幅分别达 10.2%~22.5%和 6.3%~11.8%。在水分管理方面,长期淹水仅在秸秆条件下较间歇灌溉水稻磷总吸收量增加 9.0%。这表明秸秆还田和水分管理对早稻和晚稻磷吸收量的

晚稻季,Enzyme-P 和 Citrate-P 与水稻磷素总吸收量呈显著正相关,CaCl<sub>2</sub>-P 和 Citrate-P 与水稻根系和秸秆磷含量呈显著正相关,而 Enzyme-P 却与籽粒磷含量呈显著正相关。HCl-P 与水稻磷总吸收量以及水稻磷含量无显著相关(表 4)。这表明 CaCl<sub>2</sub>-P、Enzyme-P 和 Citrate-P 对水稻磷吸收均有贡献,尤其是 Citrate-P 在土壤中含量较高,因此对水稻磷吸收的贡献也较大(表 5)。

表 5 早晚季水稻土壤生物有效性磷与水稻总磷吸收量和磷含量的 Pearson 相关分析

| 项目    | 早稻                   |          |           |        | 晚稻                   |          |           |        |
|-------|----------------------|----------|-----------|--------|----------------------|----------|-----------|--------|
|       | CaCl <sub>2</sub> —P | Enzyme—P | Citrate—P | HCl—P  | CaCl <sub>2</sub> —P | Enzyme—P | Citrate—P | HCl—P  |
| 磷总吸量  | —0.700**             | —0.384   | —0.740**  | —0.282 | 0.357                | 0.643*   | 0.795**   | 0.013  |
| 根系磷含量 | 0.454                | 0.794**  | —0.158    | —0.068 | 0.717**              | 0.097    | 0.697*    | 0.575  |
| 秸秆磷含量 | 0.803**              | 0.797**  | 0.579*    | —0.278 | 0.625*               | 0.341    | 0.766**   | 0.249  |
| 籽粒磷含量 | 0.276                | 0.752**  | —0.092    | —0.230 | 0.160                | 0.621*   | 0.175     | —0.565 |

注: \* 表示  $P<0.05$ ; \*\* 表示  $p<0.01$ ;根系磷含量为根和留茬磷含量的平均值。

3 讨论

3.1 秸秆还田和水分管理对生物有效性磷组分特征的影响

传统磷分级方法主要侧重于土壤磷化合物的不同形态<sup>[2-4]</sup>,而 BBP 法则主要从生物学利用磷素难易程度的角度考虑而创立的磷素分级方法,可模拟植物根系和微生物对土壤磷素的矿化利用,能够客观评价土壤不同磷素形态的生物有效性<sup>[5-8]</sup>。本研究发现,秸秆还田、水分管理及其之间交互作用对生物有效性磷(CaCl<sub>2</sub>—P、Citrate—P、Enzyme—P 和 HCl—P)呈显著影响(表 3)。

大量研究<sup>[12,19]</sup>报道,与秸秆未还田相比,秸秆还田显著提高了土壤全磷、速效磷以及磷酸酶活性等,秸秆含有丰富的碳源和氮磷钾等养分,施入土壤能够改善土壤理化性质,促进微生物大量繁殖和根系生长,有利于微生物和根系产生大量分泌物,如磷酸酶、各种氨基酸和低分子有机酸含量及质子(H<sup>+</sup>)等<sup>[4]</sup>,有机酸通过配位交换作用,与磷酸根(HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和 H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)竞争土壤颗粒表面的阴离子吸附位点,促进吸附于黏粒上或弱束缚于无机沉淀物中的无机活性磷的释放,即 Citrate—P 含量增加,这部分磷可以被植物利用;质子(H<sup>+</sup>)能活化难溶性矿物质磷,即 HCl—P 含量增加;磷酸酶矿化土壤中的有机磷转化为无机磷,即 Enzyme—P 含量提高。

研究<sup>[20]</sup>报道,长期淹水在秸秆还田条件下,较间歇灌溉增加土壤全磷和速效磷的含量,淹水时间影响土壤磷素形态、转化及其有效磷含量,淹水时间越长,越有利于缓效 P 源和潜在 P 源转化为有效磷<sup>[21]</sup>。这是由于土壤淹水时间长,导致土壤缺乏 O<sub>2</sub>,微生物降解稻草产生大量低分子有机酸和质子(H<sup>+</sup>),有利于活化土壤无机磷<sup>[20]</sup>,提高 Citrate—P 和 HCl—P 含量;稻田长期淹水显著降低土壤氧化还原电位(Eh),促进难溶性的磷酸铁盐(Fe<sup>3+</sup>)还原为可溶性磷酸亚铁(Fe<sup>2+</sup>),使土壤有效磷含量增加<sup>[22]</sup>,即 CaCl<sub>2</sub>—P、Citrate—P 和 HCl—P,本研究与这些报道结果一致。有研究<sup>[12]</sup>发现,与仅施化肥处理相比,秸秆还田显著提高了水稻根际磷酸酶活性,且间歇淹水比长期淹水条件下

磷酸酶活性高,增加有机磷矿化率,使 Enzyme—P 含量增加,本研究与此报道结果一致。

由土壤生物有效性磷与土壤化学性质的相关性分析得出,土壤微生物生物量显著影响 CaCl<sub>2</sub>—P、Enzyme—P 和 Citrate—P,表明这 3 种生物有效性磷与微生物关系较为密切,水稻生长过程与微生物竞争养分,土壤有效磷降低,则迫使微生物释放 SMBP<sup>[7]</sup>,转化为有效磷,以维持土壤生物有效性磷平衡和供植物吸收;本研究中秸秆还田与相对应秸秆未还田相比较显著增加了 SMBP,则 CaCl<sub>2</sub>—P、Enzyme—P 和 Citrate—P 也增加。秸秆还田为微生物提供了大量的碳源和氮源,有利于微生物活性提高,分泌大量的有机酸胞外酶(如酸性磷酸酶),提高土壤无机活性磷和有机活性磷的矿化率,使土壤 Citrate—P 和 Enzyme—P 增加。而且 Citrate—P 主要来自于吸附态磷或弱束缚于无机沉淀物(Al—P、Fe—P)中的无机活性磷<sup>[7-8]</sup>,pH 变化影响着磷的吸附与解吸<sup>[23]</sup>,也影响着 Citrate—P。HCl—P 与 STP 呈显著负相关,表明 STP 含量高时,HCl—P 含量不一定高,如秸秆还田且间歇灌溉条件下与长期淹水相比,STP 无显著差异,而显著降低 HCl—P,长期淹水则显著增加 HCl—P。

3.2 土壤生物有效性磷对植物磷吸收的影响

CaCl<sub>2</sub>—P 是能够被根系直接截留的易溶性或弱吸附的无机磷,极易被植物吸收利用,其与水稻根(除早稻季)和秸秆磷含量呈显著正相关,但土壤溶液中这部分磷含量较低。Enzyme—P 与早稻根、秸秆和籽粒磷含量呈显著正相关,而仅与晚稻籽粒磷含量呈显著正相关。Enzyme—P 是磷酸酶矿化的有机活性磷,易受土壤磷酸酶活性的影响,而磷酸酶活性易受 pH、温度和水分等土壤环境因子的影响<sup>[12]</sup>,土壤溶液中这部分磷含量略高于 CaCl<sub>2</sub>—P。Citrate—P 与水稻根(除早稻季)和秸秆的磷含量呈正相关,这是由于植物根系和微生物分泌大量的低分子有机酸,活化的无机磷(Citrate—P)增加<sup>[4]</sup>;另一方面,根际周围有效性磷含量增加,刺激磷酸酶活性的增加,促进根系对生物有效性磷(CaCl<sub>2</sub>—P、Enzyme—P、Citrate—P)的吸收。而土壤 Citrate—P 含量较高,仅次于

HCl—P 含量,被植物吸收的量较高,对植物磷素吸收的贡献较大。HCl—P 是用 1 mol/L HCl 浸提的磷,该 HCl 溶液浓度远高于植物和微生物分泌的质子浓度,可用来模拟植物根系和微生物分泌的质子活化的最大无机磷库,在酸性土壤(如红壤)中主要提取闭蓄态磷,在碱性的石灰石土壤中主要提取磷灰石型磷<sup>[23]</sup>。本研究中 HCl—P 与水稻磷含量和水稻磷吸收量相关性不显著。综上所述,CaCl<sub>2</sub>—P、Enzyme—P 和 Citrate—P 对水稻磷吸收均起作用,且 Citrate—P 含量较大,其对水稻磷吸收起主要贡献。

本研究发现,早稻季,秸秆还田处理(S1W1 和 S1W2)与相对应的无秸秆还田处理(S0W1 和 S0W2)相比较,显著降低了水稻磷素总吸收量,尤其是长期淹水条件下,秸秆还田处理水稻磷素总吸收量最低(图 1c)。这是由于稻草中 C/N 比值较高,秸秆降解初期,微生物生长繁殖需要从土壤中固定大量的无机氮,降低了土壤对植物的供氮能力,早稻初期气温较低,微生物活性也低,秸秆降解速度慢,水溶性氮释放率低<sup>[24-25]</sup>,导致水稻前期生长缓慢,致使秸秆还田处理的水稻生物量(S1W1 和 S1W2 处理分别为 8.6, 7.9 t/hm<sup>2</sup>)显著低于相对应的秸秆未还田处理(S0W1 和 S0W2 处理分别为 9.5, 9.4 t/hm<sup>2</sup>),由于水稻磷素吸收主要受水稻总生物量的影响,故秸秆还田处理也显著降低水稻总磷吸收量,尤其是秸秆还田在长期淹水条件下,水稻磷素吸收量最低(图 1c),使秸秆还田处理的磷素在土壤中累积,故 CaCl<sub>2</sub>—P 和 Citrate—P 与水稻磷素总吸收量呈显著负相关。

晚稻季,秸秆还田处理(S1W1 和 S1W2)与相对应的无秸秆还田处理(S0W1 和 S0W2)相比较,显著增加水稻磷素总吸收量,尤其是长期淹水条件下,秸秆还田处理水稻磷素总吸收量最高(图 1d)。这是由于晚稻季秸秆还田初期土壤中存在大量早稻季释放而未被利用的氮素,且气温高,秸秆降解速度快,水溶性氮释放速率也增加,微生物生物量在抽穗期达到高峰,有利于水稻发育<sup>[24-25]</sup>。秸秆还田处理水稻生物量(S1W1 和 S1W2 处理分别为 14.3, 14.2 t/hm<sup>2</sup>)显著高于相对应的秸秆未还田处理(S0W1 和 S0W2 处理分别为 13.7, 13.2 t/hm<sup>2</sup>),水稻磷素吸收量也显著增加,尤其是秸秆还田在长期淹水条件下水稻磷素吸收量最高(图 1d)。

秸秆还田处理(S1W1 和 S1W2 处理的水稻磷年吸收量分别为 54.4, 55.8 kg/hm<sup>2</sup>)与相对应的无秸秆还田处理(S0W1 和 S0W2 处理的水稻磷年吸收量分别为 52.5, 51.5 kg/hm<sup>2</sup>)相比较,显著增加水稻磷年吸收

量,但水分管理对秸秆还田条件下水稻磷素年吸收量影响不显著。这表明秸秆还田处理,无论是间歇灌溉还是长期淹水条件下,与相对应秸秆未还田处理相比较,均能显著提高磷素利用率,且二者无显著差异。秸秆还田与化肥氮磷钾减量配施,稻草资源化,实现农业秸秆循环利用,降低了随秸秆收获而离开农田生态系统的磷损失的风险,有利于农业可持续发展。

## 4 结论

双季稻田秸秆还田,配合间歇灌溉或长期淹水均提高土壤 Citrate—P 和 Enzyme—P,而长期淹水较间歇灌溉主要提高土壤 CaCl<sub>2</sub>—P。土壤有效磷(SAP)与 Enzyme—P 和 Citrate—P 显著正相关,表明稻田有效磷主要来源于 Enzyme—P 和 Citrate—P。早稻季秸秆还田处理与相应的秸秆未还田处理相比较显著降低早稻籽粒磷总吸收量;而晚稻则相反,秸秆还田处理水稻籽粒和秸秆磷吸收量高于秸秆未还田处理,且水分管理影响不显著。生物有效性磷含量(除 HCl—P 外)与水稻磷含量呈显著正相关,与早稻磷总吸收量负相关,而与晚稻磷总吸收量正相关。稻田土壤 Citrate—P 含量仅次于 HCl—P,表明土壤 Citrate—P 对水稻磷吸收起主要贡献。双季稻田秸秆还田与化肥减量配施,有利于提高土壤磷素有效性和水稻磷素利用率。

### 参考文献:

- [1] 吕真真,刘秀梅,侯红乾,等.长期不同施肥对红壤性水稻土磷素及水稻磷营养的影[J].植物营养与肥料学报,2019,25(8):1316-1324.
- [2] 孙桂芳,金继运,石元亮.土壤磷素形态及其生物有效性研究进展[J].中国土壤与肥料,2011(2):5-13.
- [3] 刘芷宇.植物的磷素营养和土壤磷的生物有效性[J].土壤,1992(2):43-47.
- [4] 陆文龙,王敬国.低分子量有机酸对土壤磷释放动力学的影响[J].土壤学报,1998,35(4):493-500.
- [5] Deluca T H, Glanville H C, Harris M, et al. A novel biologically-based approach to evaluating soil Phosphorus availability across complex landscapes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015,88:110-119.
- [6] 蔡观,胡亚军,王婷婷,等.基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J].环境科学,2017,38(4):1606-1612.
- [7] 刘玉槐,魏晓梦,魏亮,等.水稻根际和非根际土磷酸酶活性对碳、磷添加的响应[J].中国农业科学,2018,51(9):1653-1663.
- [8] 袁佳慧,汪玉,王慎强,等.稻麦轮作磷肥减施下水稻土磷素生物有效性特征[J].生态与农村环境学报,2018,34(7):599-605.
- [9] 黄翊兰,崔丽娟,李春义,等.滨海滩涂湿地不同植被土

- 壤磷的生物有效性及其影响因子分析[J].生态环境学报,2019,28(10):1999-2005.
- [10] Sarah A, Maarastawi A, Katharina Frindte, et al. Rice straw serves as additional carbon source for rhizosphere microorganisms and reduces root exudate consumption [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 235-238.
- [11] Li Y Y, Yang R, Gao R, et al. Effects of long-term Phosphorus fertilization and straw incorporation on Phosphorus fractions in subtropical Paddy soil [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 365-373.
- [12] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响 [J]. *作物杂志*, 2015(2): 84-89.
- [13] Guan X K, Li W, Neil C, et al. Improved straw management practices promote in situ straw decomposition and nutrient release, and increase crop production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250(20): 119541.
- [14] Olof A, Kálmán R, Thomas K. Water and temperature dynamics in a clay soil under winter wheat: Influence on straw decomposition and N immobilization [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, 15(1): 1-8.
- [15] Shen J L, Tang H, Liu J Y, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 188: 264-274.
- [16] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 242-248.
- [17] 鲍士旦. 土壤农业化学分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 气象出版社, 2006: 54-95.
- [19] Zhang P, Chen X L, Wei T. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 65-72.
- [20] 田娟, 刘凌, 董贵明, 等. 淹水土壤磷释放机理研究进展 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(2): 426-430.
- [21] 薄录吉, 王建国, 王岩, 等. 淹水时间对水稻土磷素形态转化及其有效性的影响 [J]. *土壤*, 2011, 43(6): 930-934.
- [22] Kraira Panond A, Jugsujinda A, Patrick W H. Phosphorus sorption characteristics in acid sulfate soils of Thailand: Effect of uncontrolled and controlled soil redox Potential (Eh) and pH [J]. *Plant and Soil*, 1993, 157(2): 227-237.
- [23] 王光火, 朱祖祥. pH 对土壤吸持磷酸根的影响及其原因 [J]. *土壤学报*, 1991, 28(1): 1-6.
- [24] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B C. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induce by cultivation practices and by laboratory incubation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46: 970-976.
- [25] 彭娜, 王凯荣, 王开峰, 等. 不同氮肥配施方法下稻草还田短期效应研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(4): 64-67.
- (上接第 308 页)
- [22] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J]. *Agronomy Journal*, 1936, 28(5): 337-351.
- [23] Greminger P J, Sud Y K, Nielsen D R. Spatial variability of field-measured soil-water characteristics [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(5): 1075-1082.
- [24] 朱绪超, 邵明安, 朱军涛, 等. 高寒草甸生态系统表层土壤水分时间稳定性研究 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 212-218.
- [25] Hudek C, Stanchi S, D'Amico, et al. Quantifying the contribution of the root system of alpine vegetation in the soil aggregate stability of moraine [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2017, 5(1): 36-42.
- [26] 于海艳, 宫汝宁, 周娅, 等. 北京八达岭地区 4 种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 162-166.
- [27] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 618-623.
- [28] Tsui C C, Tsai C C, Chen Z S. Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan [J]. *Geoderma*, 2013, 209/210: 119-127.
- [29] 杜有新, 吴从建, 周赛霞, 等. 庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1675-1681.
- [30] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105.
- [31] 程浩, 张厚喜, 黄智军, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳含量变化特征 [J]. *森林与环境学报*, 2018, 38(2): 135-141.
- [32] 王颖. 青藏高原高寒草甸不同海拔土壤微生物功能多样性 [D]. 河北 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- [33] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [34] 王兴, 祁剑英, 井震寰, 等. 长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(24): 121-128.